

# Stand und Entwicklung der Metrologie

Kind, Dieter

Veröffentlicht in:  
Abhandlungen der Braunschweigischen  
Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 45, 1994,  
S.69-80



Verlag Erich Goltze KG, Göttingen

# Stand und Entwicklung der Metrologie\*

Von Dieter Kind\*\*, Braunschweig

(Eingegangen am 9. 12.1994)

## 1. Einführung

Die internationale Meterkonvention von 1875 ist einer der ersten Staatsverträge, deren Zielsetzung praktisch alle Länder der Erde berührt. Dies ist ein Ausdruck der Tatsache, daß einheitliches Messen schon früh als Voraussetzung für die globale Entwicklung von Wirtschaft, Technik und Wissenschaft erkannt wurde. Um dieses sicherzustellen, haben die Staaten Institutionen geschaffen, die für die internationale Zusammenarbeit im Meßwesen und für die nationale Dienstleistung auf diesem Gebiet zuständig sind. Sie werden heute als „Metrologisches Staatsinstitut“ bezeichnet. Deutschland nimmt hier traditionell mit der PTB<sup>1)</sup> eine international führende Stellung ein.

Unter Metrologie versteht man dasjenige Teilgebiet der Physik, das die wissenschaftlichen Grundlagen des Messens zu erarbeiten und die Einheitlichkeit des Messens zu sichern hat. In der englischsprachigen Literatur liest man oft noch kürzer:

Metrology is the science of measurement

„Messen“ heißt, den unbekannten Wert einer physikalischen Größe mit einer Einheit der gleichen Größenart zu vergleichen. Zur Schaffung der genannten „wissenschaftlichen Grundlagen des Messens“ sind von den metrologischen Staatsinstituten im allgemeinen Fall auf zumeist experimentellem Wege drei Grundaufgaben zu erfüllen:

**Darstellung** (realization) der Einheiten gemäß der international vereinbarten Definition

**Bewahrung** (maintenance) der Einheiten in einer als Normal bezeichneten Maßverkörperung oder Meßeinrichtung

**Weitergabe** (dissemination) der Einheiten an die Anwender durch Vergleichsmessungen mit Gebrauchsnormalen.

Diese in Bild 1 dargestellten drei Grundaufgaben bereiten den Weg von der Definition der physikalischen Einheiten bis zu ihrer Anwendung. In bestimmten Fällen greift man anstelle der Darstellung einer Einheit jedoch auf ihre

**Reproduzierung** (reproduction)

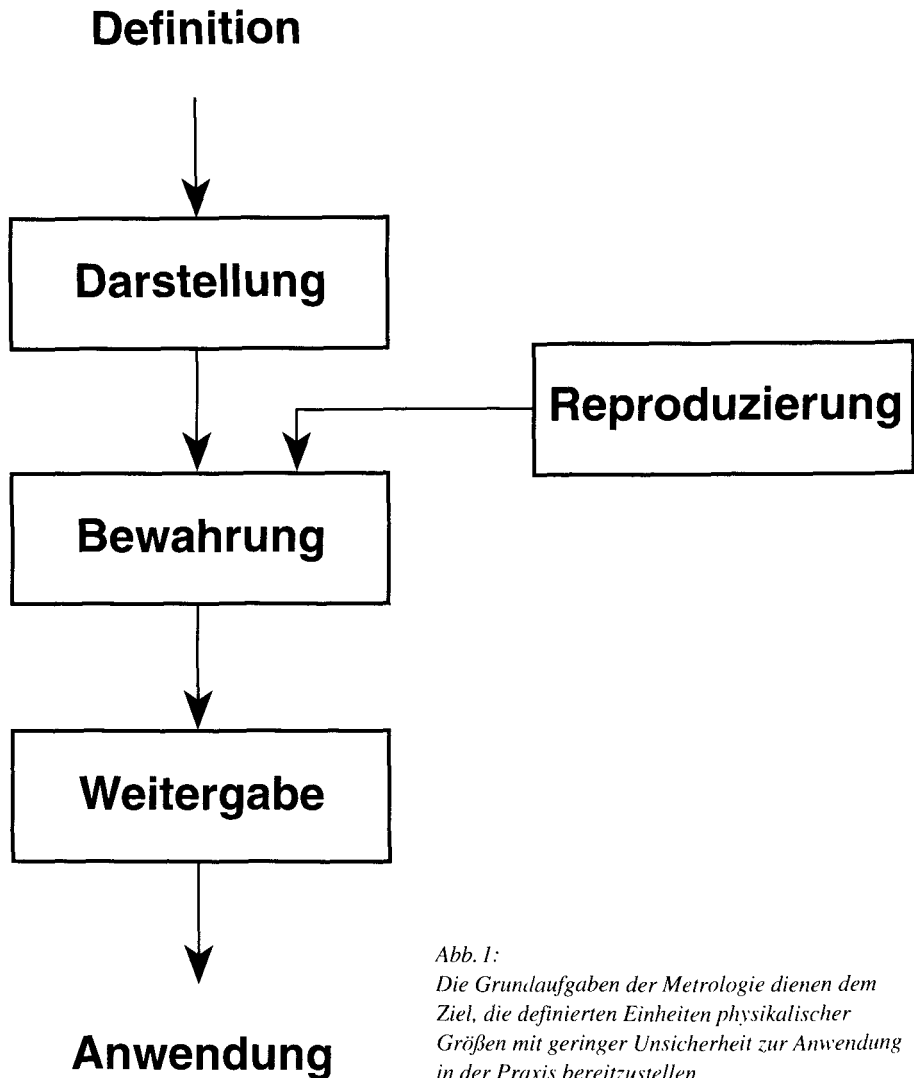
---

<sup>1)</sup> PTB = Physikalisch-Technische Bundesanstalt

---

\* Nach einem Vortrag vor der Plenarversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft am 11.02.1994

\*\* Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. D. Kind, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig



*Abb. 1:*

*Die Grundaufgaben der Metrologie dienen dem Ziel, die definierten Einheiten physikalischer Größen mit geringer Unsicherheit zur Anwendung in der Praxis bereitzustellen.*

zurück. Man versteht darunter ein Experiment, das bei wiederholter Durchführung unabhängig von Zeitpunkt und Ort immer wieder auf den praktisch gleichen Wert einer physikalischen Größe führt, ohne daß die Abweichung vom definierten Wert genau bekannt ist. Höchste Reproduzierbarkeit auch über beliebig lange Zeiträume ist aber nur dann zu erwarten, wenn das Meßergebnis in direktem Zusammenhang mit atomaren oder fundamentalen Konstanten steht, und nur für diesen Fall soll „Reproduzierung“ hier eingeführt werden.

Natürlich wird man nur dann anstelle der definitionsgemäßen Darstellung einer Einheit deren Reproduzierung wählen, wenn das zugehörige Experiment leichter durchführ-

bar ist oder wenn die Unsicherheit der Reproduzierung deutlich kleiner ist als die Unsicherheit der Realisierung. Ein solches Experiment erfüllt dann die Funktion eines Normals, durch das die betreffende Einheit bewahrt werden kann.

Die weltweit homogen verlaufene Entwicklung der Metrologie hat ihre Begründung in ihrer zwangsläufig hierarchisch strukturierten Arbeitsweise. Sie entspricht für die einzelnen Meßgrößen einer Pyramide, an deren Spitze die Definition steht, während die breite Basis der Weitergabe der Meßgröße an die Nutzer, d. h. letztenendes an jeden Bürger, gleichkommt.

Die gleichartige Aufgabenstellung der metrologischen Staatsinstitute hat zu einer die Zusammenarbeit sehr förderlichen Strukturverwandtschaft geführt. Dabei entsprechen die für die staatliche Metrologie bereitgestellten Mittel in der Regel der wirtschaftlichen Stärke des betreffenden Landes. Die politischen Ziele der staatlichen Metrologie sind die Förderung und Sicherung der Lebensbedingungen sowie die Leistungssteigerung der Wirtschaft. Sie sind nur durch ein flächendeckendes Netz verteilter meßtechnischer Kompetenz zu erreichen, das zugleich den Stand der Technologie der nationalen Wirtschaft sichert.

## 2. Tendenzen der Entwicklung

Als Ergebnis internationaler Zusammenarbeit wurde im Jahr 1960 weltweit ein einheitliches Einheitensystem SI <sup>2)</sup> beschlossen. Es besteht aus den in Bild 2 dargestellten 7 Basiseinheiten mit den durch Pfeile angedeuteten Abhängigkeiten. Von anderen Basiseinheiten unabhängig sind jedoch nur die Einheiten der Masse (kg), der Zeit (s) und der thermodynamischen Temperatur (K).

Die in großer Zahl in Technik und Wissenschaft verwendeten sogenannten abgeleiteten Einheiten physikalischer Größen können als Produkte aus Basiseinheiten ausgedrückt werden. So gilt z. B. für die Einheit der elektrischen Spannung:

$$1 \text{ V} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1}$$

Für den heutigen Stand der Metrologie gilt, daß alle theoretisch explizit formulierbaren physikalischen Phänomene in den Einheiten des SI quantitativ beschrieben werden können. Unser Bild von der unbelebten Natur stützt sich so auf ein konsistentes Netzwerk physikalischer Einheiten, die durch Naturgesetze miteinander verbunden sind, in dem Fundamentalkonstanten die Rolle von verlässlichen Festpunkten übernehmen.

Normale physikalischer Einheiten, deren Wert nur von unveränderlichen Eigenschaften von Atomen abhängt, sind mit sehr geringer Unsicherheit und unabhängig vom jeweiligen Beobachter reproduzierbar. Insbesondere hat die Entdeckung makroskopischer Quanteneffekte durch B. D. Josephson (1962) und K. v. Klitzing (1980) für den Bereich der elektrischen Einheiten die Entwicklung von Normalen ermöglicht, die auf Fundamentalkonstanten beruhen und daher von äußeren Parametern unabhängig sind. Es ist ein anspruchsvolles Ziel der metrologischen Forschung, weitere solche Normale zur Reproduzierung physikalischer Einheiten zu entwickeln.

<sup>2)</sup> SI = Système International d'Unités

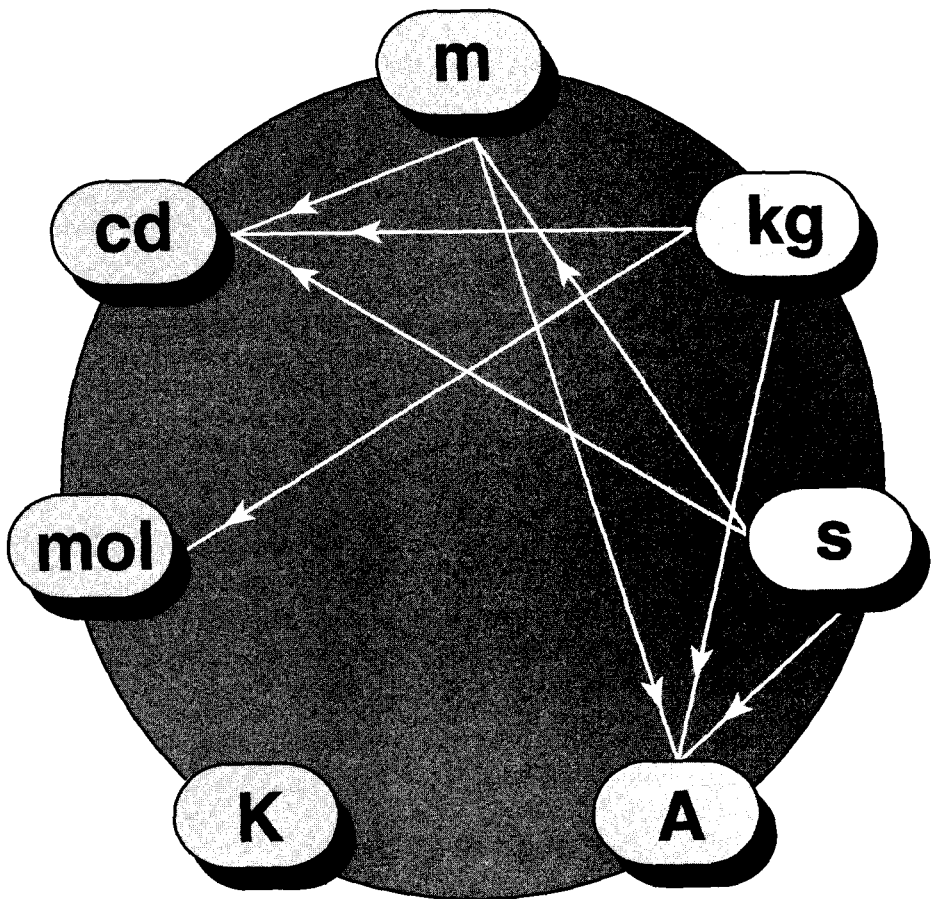


Abb. 2:

*Die sieben Basiseinheiten des SI-Systems. Nur Kilogramm, Sekunde und Kelvin sind von anderen Basiseinheiten unabhängig.*

Im allgemeinen gilt jedoch, daß die zur Bewahrung und Weitergabe verwendeten Normale veränderlich sind und daher von Zeit zu Zeit neu kalibriert, d. h. durch Vergleichsmessungen neu bestimmt werden müssen. Hinzu kommen Forderungen nach immer höheren Genauigkeiten auf fast allen Gebieten der Meßtechnik. Moderne und insbesondere automatisierte Fertigungsbetriebe, elektrische und optische Kommunikationssysteme, Mikroelektronik oder Luft- und Raumfahrt, um nur einige Beispiele zu nennen, stellen höchste Anforderungen an Genauigkeit und Zuverlässigkeit von Meßergebnissen. Die Aufrechterhaltung und Weiterentwicklung eines allen Bedürfnissen von Industrie, Wissenschaft und Staat gerecht werdenden metrologischen Netzes ist daher eine permanente Aufgabe.

### 3. Darstellung, Bewahrung und Weitergabe physikalischer Einheiten

Die Lösung der Grundaufgaben der Metrologie muß sich in jedem Fall nach den charakteristischen Eigenschaften der betreffenden physikalischen Größen richten. Dies soll zur Veranschaulichung am Beispiel der drei Basiseinheiten Sekunde, Meter und Kilogramm gezeigt werden:

#### 3.1 Zum Beispiel „Die Zeit“

Die Definition der Einheit der Zeit lautet seit 1967:

„Die Sekunde ist das 9 192 631 770fache der Periodendauer der dem Übergang zwischen den Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustandes des Atoms des Nuklids  $^{133}\text{Cs}$  entsprechenden Strahlung“.

Zur Darstellung der Sekunde wurden Apparaturen entwickelt, in denen ein Strahl von Cäsiumatomen einem elektromagnetischen Feld mit einer vorgegebenen Frequenz ausgesetzt wird (Bild 3). Zahlreiche Institute in aller Welt betreiben solche Atomuhren, deren beste die Zeiteinheit mit einer relativen Unsicherheit von etwa  $10^{-14}$  darstellt, und die zu ebensovielen voneinander unabhängigen Zeitskalen führen. Erst durch eine gewichtete Mittelwertbildung zwischen diesen Primärühren durch das BIPM<sup>3)</sup> entsteht die Internationale Atomzeitskala TAI<sup>4)</sup> als Grundlage für die gesetzliche Zeit in allen Ländern.

Für die Bewahrung der gesetzlichen Zeit eignet sich ein Satz von kommerziellen Atomuhren, die zwar nicht mit der geringen Unsicherheit der Primärühren arbeiten, da-

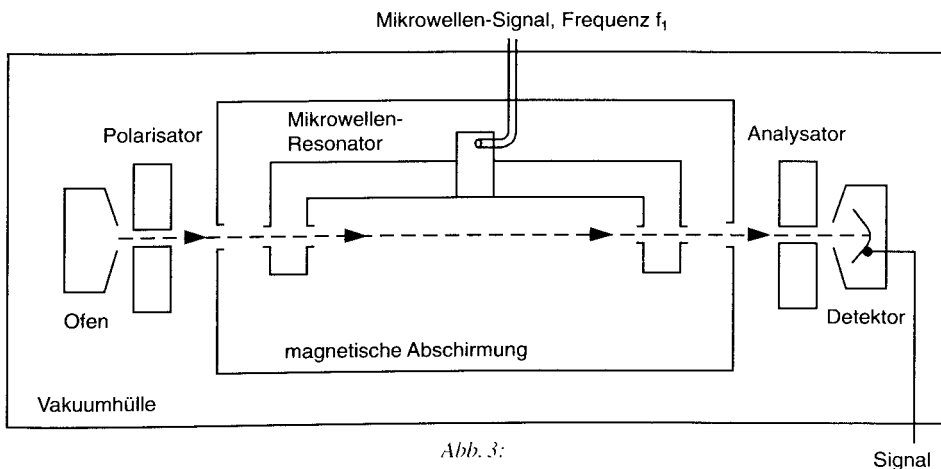


Abb. 3:  
Aufbau und Wirkungsweise einer Atomuhr

<sup>3)</sup> BIPM = Bureau International des Poids et Mesures

<sup>4)</sup> TAI = Temps Atomique International

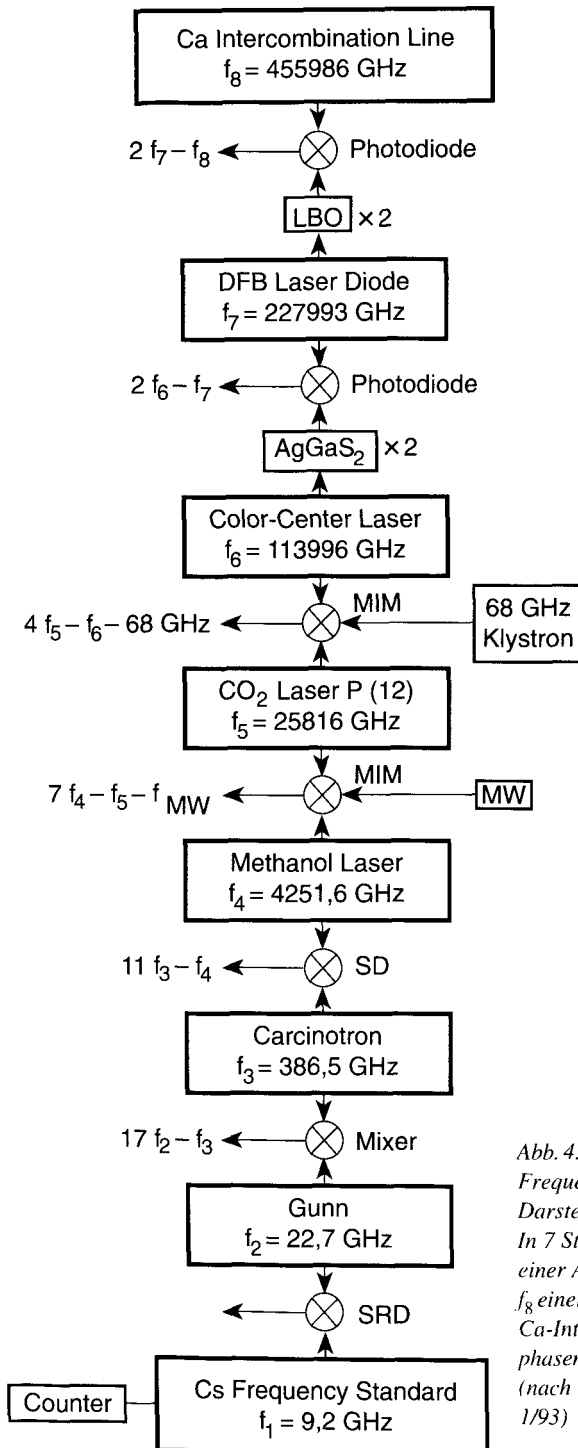


Abb. 4:  
Frequenzkette der PTB zur  
Darstellung des Meter.  
In 7 Stufen wird die Frequenz  $f_1$   
einer Atomuhr auf die Frequenz  
 $f_8$  einer  
Ca-Interkombinationslinie  
phasenstarr vervielfacht  
(nach PTB-Mitteilungen 103,  
1/93)

für aber einen unterbrechungslosen Dauerbetrieb garantieren. Sie ermöglichen jederzeit eine unmittelbare Vergleichsmessung zur Feststellung der Ganggenauigkeit anderer Uhren und damit auch gleichzeitig der Einheiten von Zeit und Frequenz.

Die Weitergabe der Zeitskala erfolgt heute meist jedoch nicht durch unmittelbaren Uhrenvergleich sondern durch Funksignale. Speziell in Deutschland wird diese Aufgabe von dem von der PTB betriebenen Langwellensender DCF 77 in der Nähe von Frankfurt/Main erfüllt, der durch im Sekundenabstand ausgestrahlte kodierte Signale die weitverbreiteten „Funkuhren“ steuert. Ohne irgendwelche Korrekturrechnungen steht damit jedermann die gesetzliche Zeit mit einer Unsicherheit von unter 100  $\mu$ s zur Verfügung.

### 3.2 Zum Beispiel „Die Länge“

Die Definition der Längeneinheit lautet seit 1983:

„Das Meter ist die Strecke, die Licht im Vakuum während der Dauer von (1/299792458)s zurücklegt“.

Die Definition beschreibt die Messung einer sehr kurzen und deshalb nur ungenau meßbaren Laufzeit. Längenmessung höchster Genauigkeit erfolgt dagegen heute durch Überlagerung elektromagnetischer Wellen, d. h. unter Anwendung der Interferometrie, wobei man aus praktischen Gründen Wellenlängen im Bereich des sichtbaren Lichts, also optische Strahlung, anstrebt. Wegen der nach der obigen Definition für ebene Wellen im Vakuum gültigen Beziehung

$$\text{Wellenlänge} \times \text{Frequenz} = \text{Lichtgeschwindigkeit} = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$

kennt man für jede Strahlungsfrequenz die zugehörige Wellenlänge und erhält durch Zählung von Wellenzügen ein genaues Längenmaß. Man benötigt daher zur Darstellung des Meter ein Experiment, bei dem die Periodendauer einer Lichtwelle im Vakuum mit Atomuhren gemessen werden kann. Diese Aufgabe erfüllt eine „Frequenzkette“ nach Bild 4, in der die Schwingungen der Atomuhren (etwa 9,2 GHz) phasenstarr mit Schwingungen im Sichtbaren (etwa 456 THz) verbunden werden.

Es ist bisher nicht möglich gewesen, das aufwendige Experiment einer Frequenzkette im Dauerbetrieb zu halten und glücklicherweise zur *Bewahrung des Meters* auch nicht erforderlich. Denn es stehen heute verschiedene Laser im Sichtbaren zur Verfügung, deren Wellenlänge durch atomare Eigenschaften mit relativen Unsicherheiten von  $10^{-10}$  auf einen festen Wert stabilisiert werden kann. Da viele von ihnen auch transportabel sind, erfüllen sie neben der Reproduzierung gleichzeitig auch die Aufgabe der Weitergabe der Längeneinheit. Daneben haben weiterhin Maßverkörperungen durch Endmaße aus Stahl eine große praktische Bedeutung für die industrielle Längenmeßtechnik.



### 3.3 Zum Beispiel „Die Masse“

Die Definition der Einheit der Masse lautet seit 1889:

„Das Kilogramm ist die Masse des internationalen Kilogramm-Prototyps“.

Massebestimmung höchster Genauigkeit erfolgt durch Massenvergleich mittels Waagen. Zur Darstellung der Masseneinheit muß daher ein Gewichtsstück einschließlich geeigneter Waage vorhanden sein, dessen Masse nur mit sehr kleiner Unsicherheit von der Masse des aus einer Platin-Iridium-Legierung hergestellten Prototyps abweichen darf. Wenn die bei der Wägung auftretenden Einflüsse durch Korrektur berücksichtigt werden, gelingt die Darstellung der Masseneinheit kg mit einer Unsicherheit unter  $10^{-8}$ .

Vergleichsmessungen des BIPM mit einer großen Zahl nationaler Kilogramm-Prototypen unter Verwendung neuartiger Waagen haben in den letzten Jahren allerdings ergeben, daß die Masse des Internationalen Kilogramm-Prototyps sich vermutlich in der Größenordnung von einigen  $10^{-9}$  kg/a verändert, ohne daß die verursachenden physikalisch-chemischen Ursachen bereits voll verstanden würden. Die in Bild 5 dargestellten neueren Ergebnisse haben die Bemühungen verstärkt, die seit 1889 bestehende Definition der Masseneinheit durch eine atomare Definition zu ersetzen. Ein baldiger Erfolg ist allerdings nicht zu erwarten.

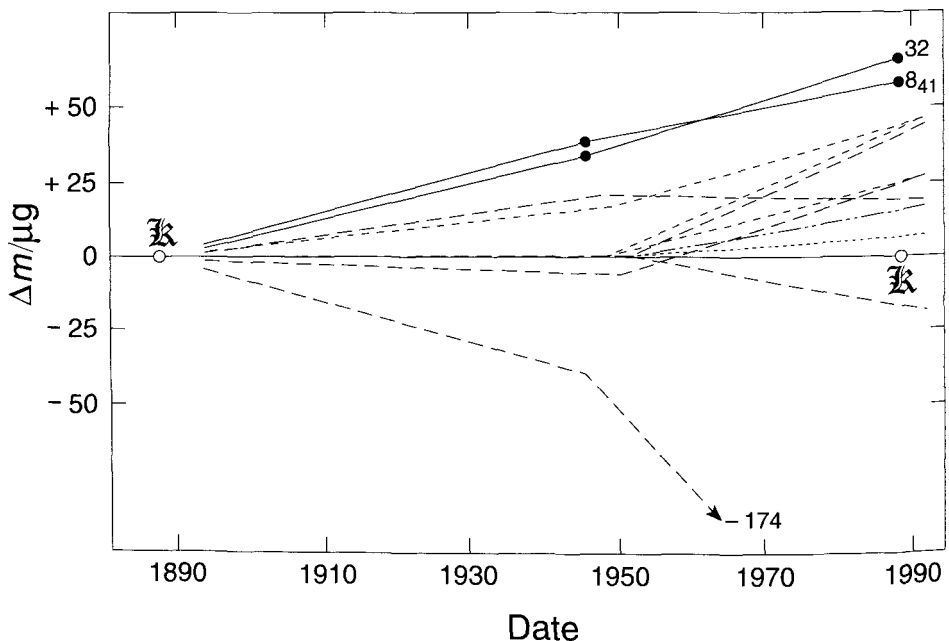


Abb. 5:

Veränderung der Masse verschiedener nationaler kg-Prototypen im Verhältnis zum internationalen kg-Prototyp (nach CIPM Report 1992)

Die Bewahrung der Masseneinheit erfolgt durch Gewichtsstücke, mit denen so sorgfältig umgegangen wird, daß ihre Masse in den Grenzen angegebener Unsicherheiten unverändert bleibt. In den meisten Fällen werden solche Gewichtsstücke aus Stahl hergestellt, wobei bei Vergleichsmessungen mit Kilogramm-Prototypen aus Platin-Iridium eine sorgfältige Luftauftriebskorrektur erforderlich ist. Gewichtsstücke aus Stahl eignen sich auch zur Weitergabe der Massenskala. Im Bereich von 1 kg werden dabei relative Unsicherheiten von  $10^{-6}$  erreicht.

#### 4. Metrologie für die Industrie

Zu den klassischen Bereichen, die auf eine Zuarbeit der Metrologie als wichtiger Teil der Infrastruktur angewiesen sind, kam in den letzten Jahren der Nachweis der Qualität industrieller Erzeugnisse. Im Rahmen der durch das Stichwort „ISO 9000“ gekennzeichneten Maßnahmen zur Entwicklung eines weltweiten Systems der Qualitätssicherung kommt den metrologischen Staatsinstituten insofern eine besondere Bedeutung zu, als sie die Rückführung von Meßergebnissen ermöglichen müssen:

**Rückführbarkeit** (traceability) ist die Eigenschaft eines Meßergebnisses, durch eine ununterbrochene Kette von Messungen mit geeigneten Normalen verglichen zu sein.

Bild 6 zeigt das grundsätzliche Schema, auf welchem Wege ein Nutzer die Rückführung seiner Meßergebnisse erreichen kann. Im gesetzlich geregelten Bereich führt dieser Weg meist über ein Eichamt, im gesetzlich nicht geregelten Bereich über ein Laboratorium eines Kalibrierdienstes. Nur in Ausnahmefällen wird ein auf höchste Präzision angewiesener Nutzer sich unmittelbar an das jeweilige metrologische Staatsinstitut wenden. Die Aufgabe des BIPM beschränkt sich darauf, bei ganz bestimmten Größen und Einheiten die Zusammenarbeit der metrologischen Staatsinstitute der Mitgliedsländer der Meterkonvention zu koordinieren.

Im gesetzlich geregelten Meßwesen besteht in Deutschland durch das Eichwesen in sinnvoller Arbeitsteilung zwischen Bund und Ländern ein flächendeckendes Netz. Für die Industrie mußte zum Nachweis der Rückführung von Meßergebnissen ein eigenes Netz aufgebaut werden. Hierfür wurde 1977 der Deutsche Kalibrierdienst (DKD) in Zusammenarbeit von Staat, vertreten durch die PTB, und Wirtschaft, vertreten durch die Mitgliedsfirmen, eingerichtet.

Ende 1993 betrug die Anzahl der akkreditierten Kalibrierlaboratorien des DKD bereits 124 mit steigender Tendenz. Dies wird auch deutlich aus der in Bild 7 dargestellten zeitlichen Entwicklung der von diesen Laboratorien jährlich ausgestellten Kalibrierscheine. Der sprunghafte Anstieg seit 1990 entstand nicht nur durch die Deutsche Vereinigung sondern auch durch die vermehrte Forderung nach einem Nachweis der Rückführung von Meßergebnissen auf die nationalen und internationalen Normale. Im Sinne der allgemein angestrebten Deregulierung staatlicher Leistungen ist zu beachten, daß auf eine für den DKD erbrachte Präzisionsmessung der PTB etwa 100 Präzisionsmessungen

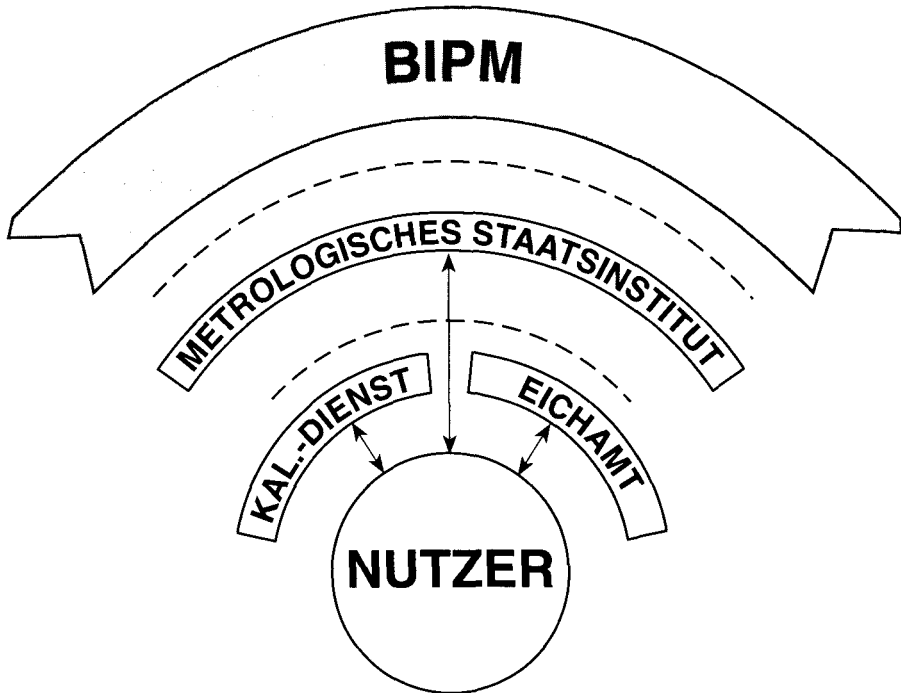


Abb. 6:

*Wege zur Rückführung von Meßergebnissen*

der Kalibrierlaboratorien kommen, von denen jede wieder die Rückführung von etwa 100 Messungen bei der industriellen Anwendung sicherstellt.

Andere Industrieländer haben inzwischen ebenfalls Kalibrierdienste aufgebaut. Stets bildet das jeweilige metrologische Staatsinstitut durch eine vergleichsweise kleine Zahl von Kalibrierungen, d. h. sehr genauen Vergleichsmessungen mit staatlichen Normalen, die Spitze der metrologischen Pyramide. Für die PTB betrug diese „vergleichsweise kleine Zahl“ von externen Kalibrierungen, im Jahr 1993 etwa 20.000, wofür Gebühren von insgesamt etwa 16 Millionen DM eingenommen wurden.

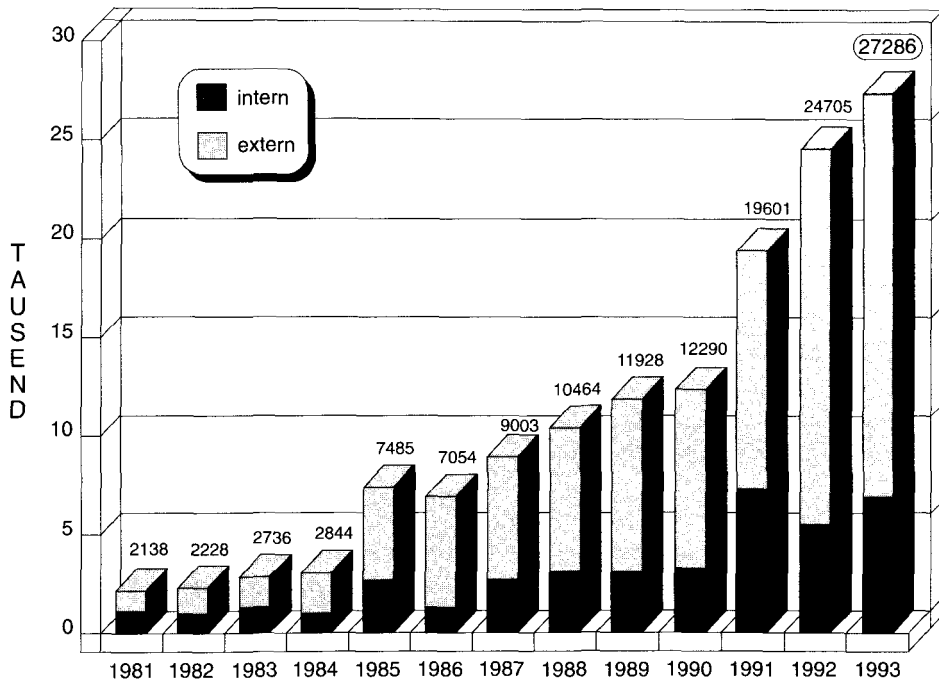


Abb. 7:

*Die Zunahme der jährlich von akkreditierten Laboratorien des Deutschen Kalibrierdienstes ausgestellten Kalibrierscheine*

## 5. Fragen und Antworten

Die Erfahrung lehrt, daß das Wesen der Metrologie dem Außenstehenden trotz vieler einleuchtender Beispiele nur schwer zu vermitteln ist. Daher soll hier versucht werden, anstelle einer Zusammenfassung drei Fragen zu stellen und zu beantworten.

### 1. Frage:

Sind denn nicht alle Probleme der physikalischen Einheiten längst geklärt? Wozu braucht man überhaupt genaue und immer genauere Messungen?

*Als Antwort ist festzustellen, daß zwar auf dem Papier alles festgeschrieben ist, das Einheitensystem SI sich widerspruchsfrei bewährt und in aller Welt eingeführt hat, daß jedoch die zur Bewahrung und Weitergabe der Einheiten verwendeten Normale im allgemeinen zeitlich veränderlich sind und daher durch Vergleichsmessungen in bestimmten Zeitabständen neu kalibriert werden müssen. Hinzu kommen steigende Ansprüche von Technik und Wissenschaft an die Genauigkeit in immer größeren Skalenbereichen, die Ausdehnung auf neue Arbeitsgebiete, wie Nanotechnologie, und neue Aufgaben, wie den Kalibrierdienst. Metrologie ist daher eine permanente und anspruchsvolle Aufgabe, die auch weltweite Zusammenarbeit und Arbeitsteilung erfordert.*

## 2. Frage:

Wenn doch schon alles international vereinbart ist, warum genügt es nicht, nur **ein** metrologisches Staatsinstitut für die ganze Welt zu betreiben?

*Die Antwort ist, daß die definitionsgemäße Darstellung von Einheiten im Meßwesen in der Regel ein schwieriges und aufwendiges Experiment darstellt, das auch große Institute nur selten durchführen können. Für das Ergebnis eines solchen Primärexperiments gibt es kein Vergleichsnorm, es sei denn, daß in einer Reihe anderer Laboratorien völlig unabhängig das gleiche Ziel verfolgt wurde. Nur wenn im Rahmen abgeschätzter Meßunsicherheiten eine Übereinstimmung festgestellt wurde, kann die Richtigkeit eines Ergebnisses unterstellt werden. Da auch große Staatsinstitute nicht auf allen Gebieten tätig sein können, ergibt sich, daß weltweit etwa zehn in diesem Sinne führende metrologische Institute zusammenarbeiten sollten, und dies ist gegeben. Das BIPM als zwar sehr qualifiziertes aber kleines Laboratorium mit etwa 40 Wissenschaftlern kann nur koordinierende Funktionen ausüben.*

## 3. Frage:

Wäre es nicht vorteilhaft, metrologische Infrastruktur durch eine Zusammenarbeit der metrologischen Staatsinstitute verschiedener Länder zu organisieren, wobei jedes Institut für ein bestimmtes Gebiet zuständig wäre, z. B. für Mechanik, Elektrizität, Optik oder ionisierende Strahlung?

*Die Antwort folgt aus der oben dargestellten Tatsache, daß die heutige Metrologie sich auf ein konsistentes Netzwerk physikalischer Einheiten stützt, die weit über das historische Konzept von „Maß und Gewicht“ hinaus voneinander abhängen. Jede genaue Messung erfordert anspruchsvolles metrologisches Können in benachbarten Gebieten. Aus diesem Grund müßte eine Aufteilung von Aufgaben durch aufwendige Koordination kompensiert werden und würde dennoch technische und wissenschaftliche Nachteile nicht vermeiden können. Ein voll ausgebautes Institut mit Kompetenz auf allen metrologierelevanten Gebieten ist immer die überlegene Lösung für die Erfüllung der Bedürfnisse eines Landes.*

Es besteht ein innerer Zusammenhang zwischen der Wirtschaftskraft eines Landes und dem Bedarf auf den verschiedenen Feldern des Meßwesens. Ein Vergleich der von den Industrieländern für das jeweilige metrologische Staatsinstitut aufgewandten Mittel hat einen Anteil von 30 bis 70 Millionstel des Bruttosozialprodukts ergeben. Zieht man in Betracht, daß große Unterschiede in Entstehungsgeschichte und Aufgabenspektrum bestehen, muß man daraus schließen, daß die Metrologie überall in der Welt einen festen Platz im Rahmen der staatlichen Infrastruktur eines Landes einnimmt.

### Schrifttum

Kind, D. und Braun, E.: Metrology in Electricity. Abh. der BWG, XLIII, 1992, S. 159–175

Quinn, T. J.: Metrology, its role in today's world. Rapport BIPM-94/5

Kind, D. und Quinn, T. J.: Metrology: Quo vadis? IEEE Trans. Instrum. Meas. IM- (im Druck)